

LPWA 通信に伴うエネルギー消費の解析と実際 — 地域農業を例として —

代表研究者 山崎 悟史 沼津工業高等専門学校 制御情報工学科 准教授

1 はじめに

近年, IoT (Internet of things) 向けに省電力かつ長距離通信可能な無線ネットワーク規格として, LPWAN (Low power wide area network) が注目されている[1]-[6]. 主な LPWAN 方式として, 免許不要で利用可能な周波数帯 (日本においては 920MHz 帯) を使用する LoRa [7], Sigfox [8] と, 免許が必要な周波数帯 (携帯電話・LTE 回線と同じ周波数帯) を使用する eMTC (enhanced Machine Type Communication) や NB-IoT (Narrow Band-IoT) [9] がある. 本研究では, 前者のうち, ユーザが自由にゲートウェイを設置でき, 柔軟な無線ネットワークの構築が可能な LoRa/LoRaWAN に着目する. LoRa とは“Long Range”に由来し, チャープ拡散スペクトラム (Chirp spread spectrum, CSS) 変調[10]と前方誤り訂正 (Forward error correction, FEC) を組み合わせた無線物理層技術を指し, Semtech 社が開発したものである[11], [12]. LoRaWAN とは, LoRa アライアンスが仕様を策定している MAC (Media access control) 層プロトコルであり[7], スター型のネットワーク構成を特徴とする. LoRaWAN の仕様はオープンに公開されているため, 利用者は独自に無線ネットワークの構築が可能である. LPWAN は様々な分野で適用可能であるが, 本研究では, 頻繁な災害被害の発生, 世界的な食料不足や次の担い手不足といった深刻な問題の観点から, スマート農業への適用を想定する[13]-[17]. スマート農業では環境条件が急速に変化していないため, 温度や湿度などのセンサーデータを 1 時間で数回程度更新するだけで十分といえるから, LPWAN の利用が適していると考えられる.

我々は地域農業の活性化に向け, 地域就農者らが運営するイチゴハウス施設 (静岡県東部某市) に, 無線センサネットワーク (Wireless sensor network, WSN) を構築・稼働してきた[18], [19]. 汎用電子部品のみで設計・開発したセンサ端末 (子ノード) にて収集された温度, 湿度などの環境情報は Zigbee 通信によって親ノードに中継され, センサ端末 (親ノード) から携帯電話 (3G) 回線を経由して, クラウドに収集される WSN である. Zigbee は 2.4GHz を活用する狭帯域通信規格であり, 鉄筋などが存在するハウス施設内の環境では十分な通信距離を確保できず, さらに電波伝搬特性も影響して受信パケットの誤りやデータの欠損といった課題が挙げられていた. そこで, LoRaWAN を用いて WSN を再構築することによって (伝送速度は低下するものの) 長距離通信の実現可能となり[10]-[23], 従来の課題に対する影響の低減が期待される. しかし, 一般に WSN ではセンサ端末のバッテリー持続性が重要課題の一つである[24]. これまで LoRaWAN を対象としたエネルギー消費の解析は行われているが[25]-[27], エネルギー消費モデルを構築する上で重要となる消費電流の測定場所は屋内である. つまり, ゲートウェイとエンドデバイス間の距離が高々数メートル程度であり, 数キロメートル程度の広域通信が可能といわれている LoRaWAN の特徴が十分に評価されているとはいえない. また, LPWAN のスループット性能に関しては実測結果が数多く示されているが[28], エネルギー消費性能に関する評価は少ない.

以上を鑑み, 本研究では, まず実機実験の予備評価として, スループットやエネルギー消費など LoRaWAN の各種性能を計算機シミュレーションによって評価する. 一般に, エンドデバイスからゲートウェイまでの距離で LoRaWAN エネルギー効率[bits/J]を評価する場合, 固定拡散率が小さい場合が優位となる. そこで, LoRaWAN 特有の機能である適応ビットレート機能に着目し, エンドデバイスがエリアのエッジ側に分布する最小距離規範モデルを提案し, 計算機シミュレーションによって適応ビットレート機能がエネルギー効率[bits/J]に与える影響を明らかにする. 次に, 汎用電子部品のみで LoRaWAN センサノードを設計・製作し, それらを活用して地域農業での利用を想定して LoRaWAN に基づく広域 WSN を静岡県東部某市エリアに構築する. それを利用したフィールド実験を行い, 構築した広域 WSN の有効性を示し, LoRaWAN のエネルギー消費に関する実測結果について考察する.

以降における構成は次の通りである. 2 章では LoRa/LoRaWAN の本研究に関わる基礎的な項目について概説する. 3 章では計算機シミュレーションを用いて提案規範および適応ビットレート化が LoRaWAN のエネルギー効率を明らかにする. 4 章ではフィールド実験結果を示し, 実測して得られたエネルギー消費性能に関する妥当性を示し考察を述べる. 5 章で結論と今後の課題を述べる.

2 LoRa/LoRaWAN

2-1 SF と ADR

CSS 変調では、一次変調された信号の周波数を時間の経過とともに変化（周波数シフト）させて送信する。受信側の復号処理では、周波数を変えながら時間方向に拡散された信号を集め、元の信号に戻す。この処理により、帯域内の一部の周波数帯域で発生する干渉、雑音の影響を軽減できる。LoRa では、信号の拡散度合、すなわち、雑音に対する耐性は、拡散率（Spreading Factor, SF ）によって決まる。 SF は 1 つのシンボルに載せることができるデータのビット数で定義される。 SF を上げることによって雑音耐性が高まり、より長距離通信が可能となるが、伝送速度が低下する。 SF は 7 から 12 まで設定可能である。Chirp 信号のシンボル長 $T_s[s]$ は $T_s = 2^{SF} / BW$ で定義される。帯域幅 BW は 62.5, 125, 250, 500[kHz], SF は 7, 8, ...12 から選択できる。FEC で定められる符号化率は、 $R_k = 4 / (4+k)$, ($k = 1, 2, 3, 4$) となる。よって、1 チャープ信号毎に SF ビットが伝送されることと FEC による符号化を考慮すると、LoRaWAN のビットレート R_b は $R_b = (SF \cdot R_k) / T_s$ で表される。以上から、拡散率 SF を大きくする、帯域幅 BW を小さくする、符号化率 R_k を小さくする、のいずれか、もしくはいくつかを同時に行うと、伝送速度が低くなり、通信距離が長くなる。一方、伝送時間が長くなるため、エネルギー消費の増加を招く。現状、他の LPWA には有していない LoRaWAN の特徴の一つとして、ADR (Adaptive data rate) 機能が挙げられる。ADR とは、伝送速度すなわち SF を受信信号対雑音比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) などチャンネル状況に応じて動的に変化させる機能である。具体的には現在の SNR が所要 SNR を満たしているかを判定し、その結果に応じて設定する SF を下げて伝送速度を向上させている。ADR を実現する際のシステム動作を概説する。各エンドデバイス (End device, 以降 ED) は周囲の基地局 (Gateway, 以降 GW) に周期的にフレームを送信し、GW は受信フレームとともに RSSI (Received signal strength indication) 値をネットワークサーバに送信する。ネットワークサーバは、複数の GW から受信した RSSI 値からチャンネル環境を推定し、それに応じて最適な伝送速度を決め、GW に伝送速度の調整を指示する。GW は ED に伝送速度の変更要求を出し、ED は伝送速度の変更を行う。

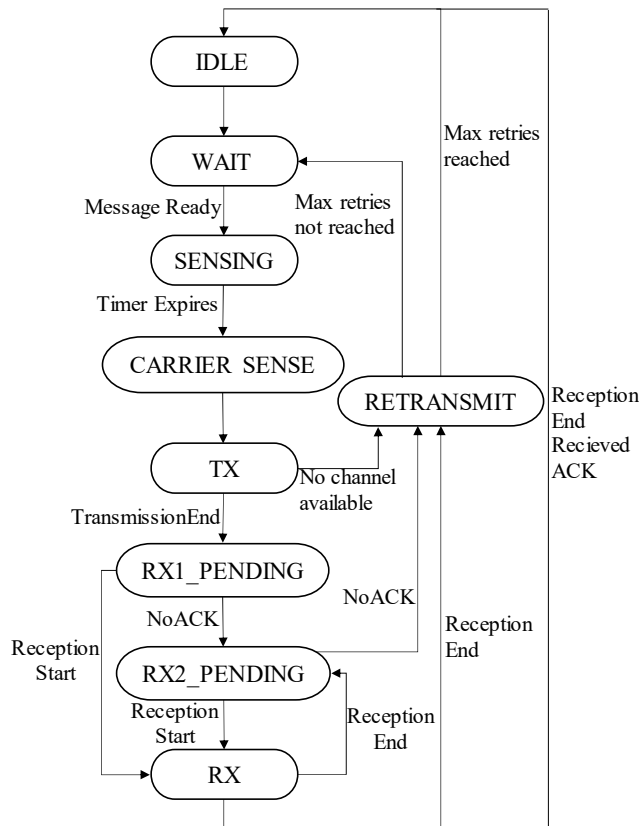


図 1. LoRaWAN (クラス A) の状態遷移例

2-2 デバイスクラス

LoRaWAN では、基地局実装の簡略化のために、MAC 層は基地局で終端せず、ネットワークサーバで終端する。ある端末からの信号は、複数の基地局での受信を可能とすることで、受信性能を向上させている。LoRaWAN ではデバイスクラスとして A, B, C の 3 つが存在するが、本研究では、基本的なクラスである A に着目する。クラス A はセンサからの情報など小さいサイズのデータの通信に適している。基地局との通信が終了すると消費電力の低いスリープモードに入ることで、消費電力を最大限減少させることができる。また基地局からの通信を行う時間が短いため、消費電力を抑えられることが特徴である。クラス A には基地局からの Ack が受け取れない場合、受信するためのプロセスを最大 2 回繰り返すのが仕様である。クラス A の状態遷移例を図 1 に示す。1 回目の受信待機状態で受信成功すると最も電力消費は小さく、2 回とも受信失敗した場合が最も電力消費が大きくなる。

3 計算機シミュレーション

3-1 評価モデルと諸元

図 2 にシミュレーションモデルを、表 1 にシミュレーション諸元を示す。GW と ED 間の最小距離を d_{\min} 、最大距離を d_{\max} 、それらの差を距離間隔 Δd とする。すなわち、 $d_{\max} = d_{\min} + \Delta d$ が成り立つ。特に ED がエリアのエッジ側に設置された際の ADR 性能を明らかにするために、次の 2 つの規範を用いる。両規範ともに上りリンクを想定し、ED から GW への通信は定周期とする。また、シミュレーション毎に ED の配置はランダムに変化するものとする。

(a) 最大距離規範

1 つの GW を中心として最大距離 d_{\max} の同心円内に N 台の ED がランダムに配置される。この場合、 $d_{\min} = 0$ とし Δd を変化させて評価する。

(b) 最小距離規範

1 つの GW を中心として最小距離 d_{\min} より大きく最大距離 d_{\max} 以内に N 台の ED がランダムに配置される。この場合、 Δd 、 d_{\min} を変化させて評価する。

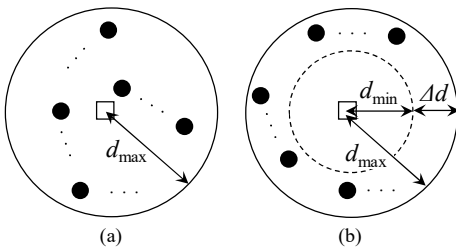
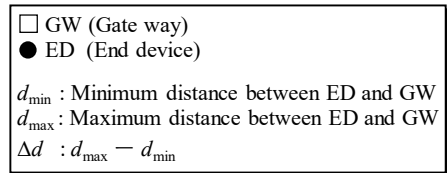


図 2. シミュレーションモデル

area_size	A circle with d as the radius
Number of Trials	500
Max Distance (From Devices to Gateway) d_{\max}	2~30[km]
Minimum Distance (From Devices to Gateway) d_{\min}	0~14[km]
Distance between Gateway and Devices Δd	2, 5, 8[km]
Number of Nodes N	20
Pass loss exponent	3.5
Shadowing Deviation σ	0
Transmitted power	10[dBm]
Packet transmission interval	400[s]
Packet size P_{size}	59[byte]
SF (Spread Factor)	7, 8, 9, 10, 11, 12, ADR
Initialization Energy of a EndDevices	100[J]
Supply Voltage V	3.0[V]
Idle current I_1	0.0014[A]
Tx current I_2	0.028[A]
Rx current I_3	0.0112[A]
Sleep current I_4	0.0000015[A]

表 1. シミュレーション諸元

3-2 評価指標

評価指標としてスループット、エネルギー消費、それらを合わせたエネルギー効率[Bits/J]を定義する。

(a) スループット TH

ED 一台あたりの、平均スループット $TH[\text{bps}]$ を次式で定義する。

$$TH(t) = \frac{P_D(t) \times P_{\text{size}}}{N \times t} \quad (1)$$

ここで、 $P_D(t)$ 時間 t [s]の間に N 台の ED から GW へ届いたパケットの総数[packets]、 P_{size} はペイロードサイズ[bits/packet]である。

(b) エネルギー消費 EC

ED 一台あたりの、平均消費エネルギー EC [J]を次式で定義する。

$$EC(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N E_n(t) \quad (2)$$

ここで、 $E_n(t)$ は n 番目の ED が時間 t 内で消費したエネルギー[J]である。本来、ED の消費エネルギーは非線形的に消費されるが、本論文では次式のように線形的に近似されるものとする。

(3) エネルギー効率 EE

ED 一台あたりの、時刻 t における平均エネルギー効率 EE [bits/J]を次式で定義する。

$$EE(t) = \frac{TH(t) \cdot t}{EC(t)} \quad (3)$$

式(3)における t をシミュレーション時間 t_{sim} [s]とし、 EE の単位は kbits/J である。

3-3 性能評価

本稿では SF の値を 7~12 の各々固定で設定した場合と、ADR を用いて SF を可変に設定した場合のエネルギー効率の性能比較を示す。

(a) 最大距離規範

図 3 に最大距離 d_{max} に対する平均エネルギー効率 EE を示す。式(3)から EE はスループット TH とエネルギー消費 EC を合わせた特性となる。図 3 より ADR を用いた場合、 d_{max} が 8km 程度までのときは、 $SF=7$ と同様、ADR のエネルギー効率が最良である。しかし、 d_{max} が 8km 程度以上になると、ADR の EE 特性は劣化している。これは、例えば $SF=7$ と比べて、 TH 特性とくべて EC 特性が劣化していることに起因する。ADR を用いない場合、 SF が小さい程、 EE が良好である。これは TH と比較して EC の効果が支配的になっているためである。以降、スループット TH とエネルギー消費 EC の特性について考察する（誌面の都合上、特性の結果については省略する）。まず、スループット TH について、ADR を用いない場合、 d_{max} が 8km 程度までは SF によるスループット変化が見られないが、 d が 8km 程度以上になると、 SF がより大きくなるとスループットが向上する。ADR を用いた場合、 d_{max} に関わらず $SF12$ と同様に最良の性能を示している。これは d_{max} に応じて最適な SF を選択するためである。次にエネルギー消費 EC について、ADR を用いない場合、 d_{max} に関わらず、 EC は一定となる。これは、 SF 毎に伝送速度が固定されているため、距離に関わらずフレームの送信時間が SF 毎に一定となることに依る。また、 SF がより大きくなればより EC が増大している。これは SF が 1 大きくなればビットレートが約 1/2 倍に低下し、送信時間が約 2 倍に増加することに起因する。ADR を用いた場合、 d_{max} が 8km 程度までは ADR のエネルギー消費は $SF=7$ のそれと同じである。これはスループット性能から各々の d_{max} において、ADR によってより多くの ED が相対的に小さな SF が設定されていると考えられる。一方、 d_{max} が 8km 程度以上になると、 d_{max} が大きくなるにつれ、エネルギー消費が増大している。これは多くの ED により大きな SF が設定されるためである。

(b) 最小距離規範

図 4 に最小距離 d_{min} に対する平均エネルギー効率 EE を示す。 EC と TH の特性を合わせると、 SF 毎に d_{min} が大きくなるにつれ EE が減少し、最終的に EE が 0 となる d_{min} の存在を示唆している。また、 $d_{\text{min}}=5$ km 付近までは $SF=7$ の場合が最良の EE 性能を示すが、 d_{min} が 6km 以降では、ADR を用いた場合が最良の EE 性能を示している。以降、スループット TH とエネルギー消費 EC の特性について考察する（誌面の都合上、特性の結果について

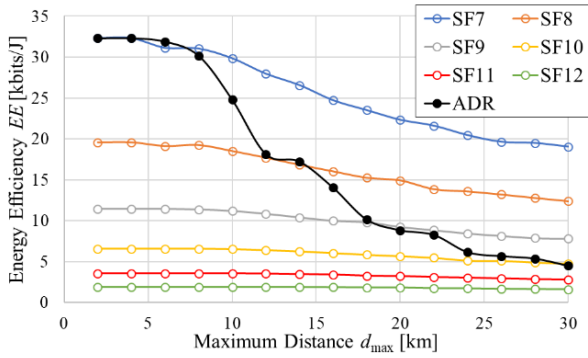


図 3. 最大距離規範におけるエネルギー効率

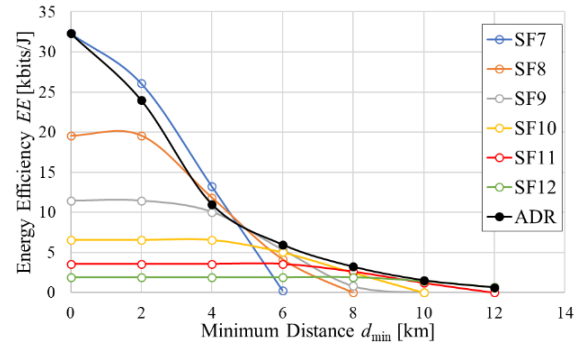


図 4. 最小距離規範におけるエネルギー効率

は省略する)。まず、スループット TH について、SF 毎に d_{min} が大きくなるにつれスループット TH が減少し、最終的にスループット TH が 0 となる d_{min} が存在することがわかる。これは最大距離規範における結果と同様である。ADR を用いたときの TH は SF=12 と同等である。次にエネルギー消費 EC について、ADR を用いない場合、最大距離規範と同様に SF 毎に EC は一定となる。ADR を用いた場合、 d_{min} の増加に伴い EC も増大し $d_{min} = 12\text{km}$ 以降で SF=12 と同等となる。これは、最大距離規範では d_{max} が大きくなっても SF が小さい状態で通信可能な ED が存在していたのに対し、最小距離規範では d_{min} の増加に伴い、多くの ED の SF が大きくなると考えられる。すなわち、最大距離規範と比べて最小距離規範の方が、GW から ED までの距離に応じて ADR 機能が動作している結果、エネルギー消費増加に繋がっているといえる。最後に Δd がエネルギー効率 EE に与える影響について論じる。最小距離規範において Δd を 2, 8 としたときのエネルギー効率 EE を評価する。基本的な傾向は Δd を 5 のときと同様であるが、 Δd が大きくなるにつれ、エネルギー効率 EE が低下する。これは、 Δd が大きくなると ED の分布範囲が広がり、より大きな SF を用いなければ通信できない状況になることから、ADR を用いない場合は TH の、ADR を用いる場合は EC の劣化が支配的になるためである。結果から、 Δd の値に依らず、 d_{min} が 6km 以降で ADR のエネルギー効率 EE 性能が最良となることがわかった。

4 フィールド実験

4-1 実験概要

IoT のユースケースとして地域農業を想定し、LoRaWAN の実環境におけるエネルギー消費性能を評価する。LoRaWAN センサ端末 (ED) は、LoRaWAN 対応 IoT センサモジュール LoRa mini-JP [29] をベースに、市販で購入可能なセンサ類のみを用いてセンサノードを設計・開発した。本稿では温度、湿度、照度を計測対象とし、単三電池 3 本で動作可能とした。3D プリンタで造形したボックスの中にモジュール一式が格納されている。GW は、市販の LoRaWAN ゲートウェイ Dragino LG01 [30] を用いる。実験場所は、静岡県東部某市の果樹栽培ハウスと守山山頂展望台間の見通し環境であり、ハウス内に ED 1 台を、展望台山頂に GW 1 台を設置した。展望台の高さは約 100m、ハウスから展望台までの距離は約 618m であり、実質的な距離は約 626m である。ED が設置されたハウス風景を図 5 (a) に、GW が設置された山頂風景を図 5 (b) に示す。実験手順は次の通りである。(1) ハウスにセンサ端末を設置する。オシロスコープを使用し、ED と GW のデータ通信を行った時の消費電流波形を蓄積する。(2) SF=7~12 の各 SF で Ack の受信に 1 回目の受信待機状態で成功した場合、1 回目の受信待機状態で受信失敗し 2 回目の受信待機状態で成功した場合、2 回とも受信失敗した場合の 3 つのパターンの電圧波形を記録する。(3) オシロスコープから記録したデータを取得し、LoRaWAN における通信時の電力消費について評価・考察する。



(a) 地域就農者ハウス内に設置されたエンドデバイス



(b) 山頂に設置されたゲートウェイ

図 5. 実験フィールドの概観

4-2 実験結果

(1) 受信成功回が消費電流に与える影響

エンドデバイスからゲートウェイへデータを送信する際の消費電流波形をオシロスコープによって測定する。SF の値を 10 に固定し、(a) 1 回目で受信成功した場合、(b) 1 回目で受信失敗し 2 回目で受信成功した場合、(c) 2 回とも受信失敗した場合の 3 パターンについて経過時間に対する消費電流を測定する。結果を図 6 に示す。図 1 で示した LoRaWAN の状態遷移の動作が検証され、設計・製作したセンサ端末を含め、実験結果の妥当性が確認された。

(2) SF が消費電流に与える影響

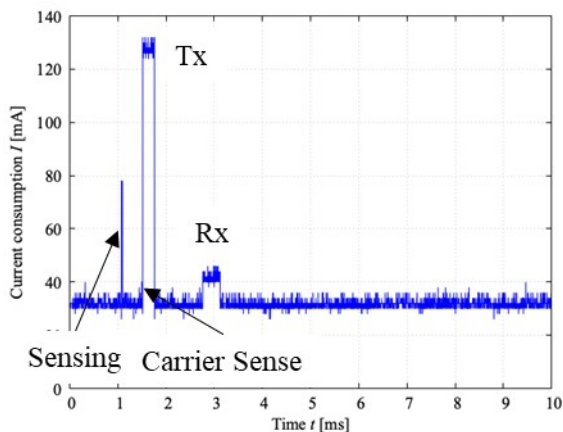
SF が大きくなるにつれてより多くの電力を消費することが確認された。これは伝送速度が下がるため送受信の時間は長くなるためである。

(3) 送信データにおけるペイロード長と SF が送信時間(Tx time)に与える影響

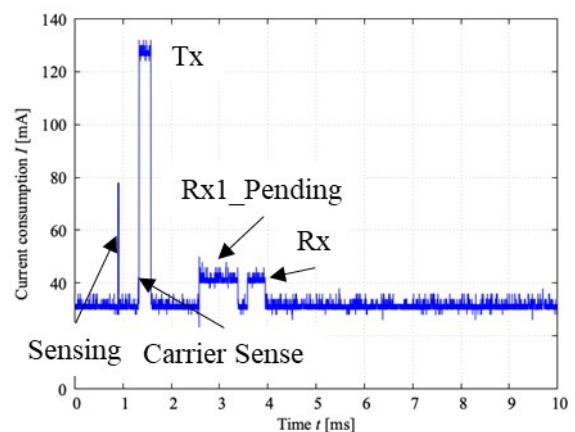
結果を図 7 に示す。ペイロード長、または SF が大きくなるにつれ送信時間が大きくなる。これは妥当な結果といえる。さらに前者は一次で、後者は二次で近似できることがわかった。全体として送信時間がペイロード長と SF の二次曲面で表されることが可能となるが示唆された。

(4) SF がキャリアセンス時間に与える影響

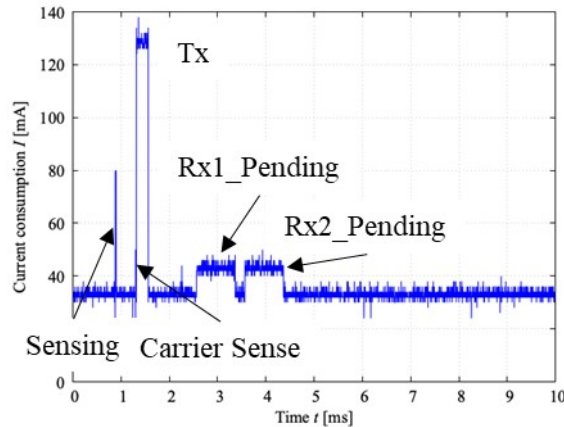
国内では、LoRaWAN や Sigfox など特定小電力無線を使用する際に、データ送信前に搬送波検知 (Carrier Sense, CS) が義務付けられている。SF に対するキャリアセンス時間を測定した結果、SF を大きく設定するにつれ、より長い CS 時間が観測された。これは、SF が大きくなるとより長距離通信が可能となるため、CS 範囲が広域化するためである。具体的には、CS 時間は SF の 2 次関数として表されることがわかった。



(a) 1 回目の受信で成功した場合



(b) 2 回目の受信で成功した場合



(c) 2 回目とも受信に失敗した場合
 図 6. 受信成功回が消費電流に与える影響

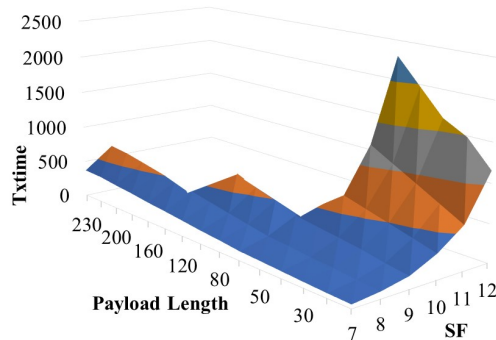


図 7. 受信成功有無が消費電流に与える影響

5 まとめ

本研究では、IoT 向けの LPWAN 規格のうち、ユーザが自由にゲートウェイを設置でき柔軟なネットワーク構成を可能とする LoRaWAN に着目し、そのエネルギー消費特性について計算機シミュレーションと実機実験の両面から評価、考察を行った。具体的には以下の 2 点について実施し、新たな知見を得た。

- (1) エンドデバイス (ED) がエリアのエッジ側に分布する最小距離規範モデルを提案し、LoRaWAN が具備する適応ビットレート (ADR) 機能がエネルギー効率 [bits/J] に与える影響を計算機シミュレーションによって評価した。特に、エリア内の中心に存在するゲートウェイから一定の距離以降のみに ED が存在する場合、エネルギー効率の観点で ADR が最良となることが示唆され、本評価での一定距離は 6km であることを明らかにした。ED がエリアのエッジ側に密集するような環境では ADR が特に有効に動作することを示した。さらに、 Δd の値に依らず、 d_{\min} が約 6km 以降で ADR のエネルギー効率性能が最良となることがわかった。
- (2) IoT のユースケースとして地域農業を想定し、LoRaWAN による広域無線センサネットワークを構築、評価した。具体的には、汎用電子部品のみで LoRaWAN センサノードを設計・製作し、データ送信に伴うエネルギー消費特性を測定した。結果、LoRaWAN の状態遷移の動作が検証され、設計・製作したセンサ端末を含め、実験結果の妥当性が確認された。さらに、ペイロード長は送信時間に対して一次関数的に増加し、SF は送信時間に対して二次関数的に増加することを実験的に明らかにした。

今後の課題は、本研究で得た知見を基に更なる実験データの取得と解析を行い、LoRaWAN

のエネルギー消費モデルを確立することである。

【参考文献】

- [1] U. Raza, P. Kulkarni, M. Sooriyabandara, “Low Power Wide Area Networks: An Overview,” *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol.19 , no.2, 2017.
- [2] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, “A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment,” *ICT Express*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2019.
- [3] H. Wang and A. O. Fapojuwo, “A Survey of Enabling Technologies of Low Power and Long Range Machine-to-Machine Communications,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2621–2639, 2017.
- [4] P. P. Ray, “A survey on Internet of Things architectures,” *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vol. 30, no. 3, pp. 291–319, 2018.
- [5] R. S. Sinha, Y. Wei, and S. H. Hwang, “A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT,” *ICT Express*, vol. 3, no. 1, pp. 14–21, 2017.
- [6] 鄭立, IoT ネットワーク LPWA の基礎 -SIGFOX、LoRa、NB-IoT-, リックテレコム, 2017.
- [7] <https://lora-alliance.org/>
- [8] <https://www.sigfox.com/en>
- [9] Y. P. E. Wang *et al.*, “A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 3, pp. 117–123, 2017.
- [10] A. J. Berni and W. D. Gregg, “On the utility of chirp modulation for digital signaling,” *IEEE Transaction on Communications*, vol. 21, no. 6, pp. 748-751, 1973.
- [11] L.Vangelista, A.Zanella and M.Zorzi, “Long-range IoT technologies: The dawn of LoTa (TM),” *Future Access Enablers of Ubiquitous and Intelligent Infrastructures*, pp. 51-58, Springer, 2015.
- [12] F.Sforza, “Communications system,” US Patent 8406275, 2013.
- [13] T. Fukatsu and M. Hirafuji, “Field Monitoring Using Sensor-Nodes with a Web Server,” *J. Robot. Mechatronics*, vol. 17, no. 2, pp. 164–172, 2005.
- [14] N. Wang, N. Zhang, and M. Wang, “Wireless sensors in agriculture and food industry - Recent development and future perspective,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 50, no. 1, pp. 1–14, 2006.
- [15] T. Ojha, S. Misra, and N. S. Raghuvanshi, “Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 118, pp. 66–84, 2015.
- [16] M. Ayaz, M. Ammad-Uddin, Z. Sharif, A. Mansour, and E. H. M. Aggoune, “Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 129551–129583, 2019.
- [17] X. Feng, F. Yan, and X. Liu, “Study of Wireless Communication Technologies on Internet of Things for Precision Agriculture,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 108, no. 3, pp. 1785–1802, 2019.
- [18] 山崎悟史, 切岩祥和, 青野雅樹, “積算値と差分値を用いる回帰分析による収穫量推定 -施設栽培イチゴへの基礎検討-”, 電子情報通信学会論文誌, vol.101, no.10, pp.1466-1470, Oct. 2018.
- [19] 山崎悟史を含む 59 名, IoT ビジネス・機器開発における潜在ニーズと取り組み事例集 (分担: 第 9 章 第 3 節 pp.255-263, 農業における IoT), 技術情報協会, 2016.
- [20] J. Haxhibeqiri *et al.*, “LoRa Scalability: A Simulation Model Based on Interference Measurements,” *Sensors*, 17(6),1193, pp.1?25, May, 2017.
- [21] R. Fernandes, R. Oliveira, M. Luis, S. Sargento, “On the Real Capacity of LoRa Networks: the Impact of Non destructive Communications,” *IEEE Communications Letters*, 2019.
- [22] D. Magrin, M. Centenaro, and L. Vangelista, “Performance Evaluation of LoRa networks in A Smart City Scenario,” *Proc. of IEEE ICC 2017*, pp.127, May, 2017.
- [23] A. Lavric *et al.*, “Long Range SigFox Communication Protocol Scalability Analysis Under Large-Scale, High-Density Conditions,” *IEEE Access*, vol. 7, no. 1, pp.35816 - 35825, Apr. 2019.
- [24] L.M. Feeney, M. Nilsson, “Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment,” *proc. IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, pp. 1548–1557, Apr. 2001.

- [25] T. Bouguera et al, “Energy consumption model for sensor nodes based on LoRa and LoRaWAN,” *Sensors*, 18(7), 2018.
- [26] R. K. Singh et al, “Energy consumption analysis of LPWAN technologies and lifetime estimation for IoT application,” *Sensors*, 20(17), 2020.
- [27] Y. Song, J. Lin, M. Tang, S. Dong, “An Internet of Energy Things Based on Wireless LPWAN,” *Engineering*, vol.3, no.4, pp.460-466, Aug. 2017.
- [28] L. Joris et al., “An Autonomous Sigfox Wireless Sensor Node for Environmental Monitoring,” *IEEE Sensors Letters*, vol.3, no.7, Jul. 2019.
- [29] Dragino Technology Co., Limited, “LoRa Mini Dev featuring LoRa® technology”.
<http://www.dragino.com/products/lora/item/126-lora-mini-dev.html>
- [30] Dragino Technology Co., Limited., “LG01-P IoT Gateway featuring LoRa® technology”.
<http://www.dragino.com/products/lora-lorawan-gateway/item/117-lg01-p.html>

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
A Simple and Energy-Efficient Flooding Scheme for Wireless Routing	<i>International Journal of Wireless Communications and Mobile Computing</i> , Wiley, Hindawi	Aug. 2020
Sigfox 通信に伴うエネルギー消費の実験的解析	電子情報通信学会ソサイエティ大会	2021年9月(発表予定)
ユーザ分布が LoRaWAN のエネルギー効率に与える影響	電子情報通信学会ネットワークシステム研究会	2021年9月(発表予定)